

< 논 문 >

인체모형을 이용한 중장비 운전실 설계용 CAD 프로그램

손 권* · 이희태**

(1996년 5월 6일 접수)

A Computer-Aided Design Program of Man-in-Cab for Heavy Construction Vehicle

Kwon Son and Hee Tae Lee

Key Words : CAD Program(컴퓨터운용 설계 프로그램), Ergonomic Evaluation(인간공학적 평가), Human Model(인체모형), Workplace Model(작업장모형), View Test(시야 평가)

Abstract

This paper presents a CAD program developed on a microcomputer in order to support graphic and computational assessment of ergonomic problems associated with the design of a man-in-cab system. The program is coded to help workspace designers with ergonomic evaluations needed in the design stage. This paper proposes a biomechanical-ergonomic approach to the cab design using man and workplace models. The human model is developed to have dimensions obtained from the Korean anthropometric data reported in 1992. Its graphical representation is based on a wire-frame model but, whenever necessary, body segments can be represented by a solid model with hidden line/faces removed and shaded. Workplace models are presented for cabs of the excavator, one of the most popular construction vehicles. A workplace model consists of an operator seat, a steering wheel, two control levers, two pedals, and a control panel. The workplace elements can be modified in their sizes, positions, and orientations by changing the reference point and design parameters. An algorithm for the view test is suggested and loaded to provide a visual evaluation of the overall layout of a workplace model.

1. 서 론

운전실과 같은 작업공간에 대한 기존의 설계 및 평가 방법은 도면을 작성하고, 이에 따라 모형이나 시제품을 제작한 후, 피실험자를 통하여 모의실험을 수행하는 것이었다. 이러한 재래식 방법에서는 설계의 결함이 모의실험 전까지 발견되지 않는 경우, 수정으로 인한 기간의 지연, 제작에 따른 노력

과 비용의 증대, 한정된 피실험자에 의한 실험에서의 객관성 결여 등의 문제점이 있다.⁽¹⁾ 기존 평가 방법의 단점을 보완하고 운전실 설계에서 운전자의 작업 효율성, 안전성, 안락성을 극대화시키기 위해서는 인간공학 및 인체공학적인 측면을 고려한 CAD 프로그램의 개발이 필요하다.

CAD 프로그램은 설계자에게 높은 융통성을 제공하여 설계 계획 및 평가, 대안의 비교, 결과의 시각적 분석 등 여러 단계에 사용될 수 있다.⁽²⁾ 제품, 장비, 작업장 등의 설계에 사용되는 CAD 기법에 인체공학을 바탕으로 한 인체모형(human

*회원, 부산대학교 기계공학과 및 기계기술연구소

**한국타이어(주) 중앙연구소

model)을 적용하여, 시야평가나 리치평가와 같은 인간공학적 평가기능을 추가하면, 시제품이나 모형을 직접 만들지 않고서도 프로그램을 통하여 인간-기계 상호작용을 평가할 수 있다.

1980년대부터 구미에서는 인간공학이나 인체공학에 바탕을 둔 프로그램을 활발히 개발해 왔다.^(3,4) Case 등이 개발한 SAMMIE(System for Aiding Man-Machine Interaction Evaluation)는 가장 많이 사용되고 있는 프로그램으로 승용차, 트럭, 지하철의 운전실 설계 등 다양한 분야에 응용되고 있다. McDaniel이 개발한 COMBIMAN(COMputerized Biomechanical MAN model)은 헬리콥터 조종석의 공간배치를 설계하기 위하여 조종사의 모델을 사용하였다. 이 프로그램과 연관된 CREW CHIEF는 항공기의 정비기술자가 작업할 수 있는 공간에 대한 평가를 위해 개발되었다. Kloke가 개발한 WERNER는 사무실 작업환경을 위한 설계 프로그램이다. Launis와 Lehtelä가 개발한 ergo-SHAPE은 AutoCAD를 기반으로 인체모델을 생성하고, AutoLISP를 이용하여 생체역학적 해석을 하는 프로그램이다. 이 프로그램은 자체적으로 그래픽 결과를 제공할 수 없어 상용 AutoCAD 패키지 이용해야 하는 단점이 있다. Westerink 등이 개발한 TADAPS(Twente Anthropometric Design Assessment Program System)는 인체모델을 이용하여 자동차 운전실 내부에서의 운전자의 자세, 리치, 시야를 평가할 수 있는 시스템이다. 그러나, TADAPS는 인체모델이 너무 단순하다는 결점을 가지고 있다.

국내에서 수행된 연구로 1993년에 발표된 강동식과 정의승^(5,6)이 Unix 환경에서 개발한 인체모델이 있다. 그들의 연구는 한국인의 인체자료를 기반으로 행해졌는데, 그 이유는 외국에서 개발된 프로그램으로는 한국인에 대한 평가에 사용할 수 없기 때문이다. 개발된 작업장모델(workplace model)은 일반 사무환경의 설계 및 평가에 중점을 두었으며, 프로그램이 워크스테이션용으로 개발되었기 때문에 좋은 그래픽 지원을 받을 수 있었다. PC용 프로그램의 개발은 상대적으로 한정된 메모리와 열악한 그래픽 환경을 극복해야 하는 어려움이 따르나, 개인용 컴퓨터가 급격한 속도로 향상되고 보편적으로 사용되는 시점에서 PC용 프로그램의 개발이 중요시되고 있다. 특히 국내에서 중장비 운전석의 설계를 위해 개발된 프로그램은 거의 전무한 실정이다.

본 논문에서는 건설중장비인 굴삭기의 운전석을 설계하고 평가하는 데 사용될 수 있는 PC용 프로그램의 개발에 대해 다루었다. 한국인 인체자료에 기초하여 운전실의 인간공학적 설계 및 평가용 소프트웨어를 구성하는 방법을 제시하였다. 전체 프로그램을 그래픽, 모델링, 평가기능, 사용자 인터페이스의 네 부분으로 나누어, 인체 및 작업장의 모델링에 따라 입력된 평가를 시각적으로 확인할 수 있도록 하였다. 인체모델을 그래픽으로 표현하기 위하여 국민표준체위조사 보고서⁽⁷⁾에 발표된 84개 항목에 대한 인체측정자료를 이용하였다. 다양한 체형을 지닌 운전자에 대한 평가가 가능하도록 한국인의 표준체위를 퍼센타일(percentile)과 연령별로 분류하여 구성하였다. 작업장의 모델링에 굴삭기 운전실의 외형과 그 내부 요소인 운전석, 운전대, 케달, 레버 및 콘트롤박스, 패널 등을 포함시켰다. 평가 기능으로는 시야평가(view test), 리치평가(reach test), 진동평가(vibration test)를 갖추었다. 본 논문에서는 프로그램, 인체모델, 그리고 시야평가에 대해서 중점적으로 기술하였다.

2. 프로그램

2.1 구성 및 개요

프로그램은 Fig. 1과 같이 크게 그래픽, 모델링, 평가기능, 사용자 인터페이스의 네 부분으로 구성된다. 그래픽 부분에 인체모델, 작업장모델, 평가

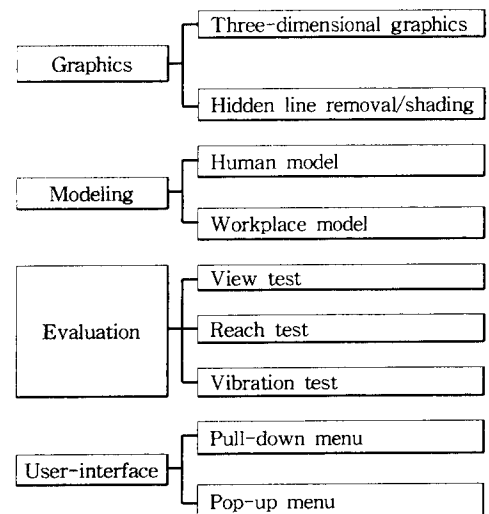


Fig. 1 Structure of program

기능 등의 시각적 제시를 위한 3차원 그래픽과 인체모델의 은선/은면의 제거 및 음영처리를 포함시켰다. 모델링 부분에서는 한국인 인체측정자료를 이용한 인체의 모델링과 굴삭기 운전실 외형과 내부 구성요소의 모델링을 담당하였다. 평가기능 부분은 리치평가, 시야평가, 진동평가로 나누었다. 평가 기능을 보조하기 위해서 운전실 구성요소의 설계변수와 그 기준점의 위치 변경을 다룰 수 있는 기능을 두었다. 사용자 인터페이스 부분은 주메뉴에서 풀다운메뉴방식을 사용하였고, 세부메뉴에서는 팝업메뉴방식을 사용하였다. 풀다운메뉴방식을 채택함으로써 다양한 메뉴의 추가 및 정보의 표시를 위해 보다 넓은 공간을 확보하였다.

인체모델은 기본적으로 와이어프레임(wireframe)으로 표현하였다. 이로 인하여 인체모델의 식별이 어려운 경우를 대비하여 모델의 인식력을 높이기 위하여 은선/은면의 제거와 음영처리를 추가하였다. 일반적으로 음영처리에는 많은 시간이 소요되므로 설계자가 원할 때만 음영처리된 모델을 얻을 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 은선/은면의 제거에 스캔라인 z-버퍼방식을 이용하였고, 음영처리 알고리즘으로는 Phong 음영처리방식⁽⁸⁾을 사용하였다.

작업장모델인 굴삭기 운전실의 외형과 내부 구성요소인 운전석, 운전대, 레버, 페달, 패널 등도 기본적으로 와이어 프레임으로 표현하였다. 모델링에 포함된 구성요소들이 운전실의 인간공학적 설계와 평가의 대상이 되도록 프로그램을 구성하였다. 운전석의 모델링에서는 착석시 한국인의 체형을 측정하여 얻은 의자의 외형에 기초하여 좌판과 등판의 외형을 구성하였으며, 팔걸이도 운전석의 일부분으로 모델링에 포함시켰다.^(9,10) 운전대, 콘트롤박스, 조종레버, 페달, 패널 등의 수치는 상업용 굴삭기의 운전실 도면을 참고하여 프로그램에 사용하였다.

시야평가는 그래픽 화면을 통해 운전실에 앉은 운전자에게 제공되는 실내의 공간배치를 평가하는 것으로 정의하였다. 인체의 시야영역을 타원뿔로 모델링하고, 시야평가 알고리즘을 제안하여, 시야내에 들어오는 부분만을 화면에 나타내도록 하였다. 운전자의 시각위치에 따라 내부의 영상이 바뀌게 되므로, 시야평가가서 키보드를 이용하여 시각 위치를 변화시킬 수 있는 기능도 마련하였다.

리치평가는 주어진 인체의 앉은자세에서 팔, 아

랫팔(lower arm), 장단지(lower leg) 등의 평가로 나누어지며, 손끝이나 발끝이 닿을 수 있는 공간을 포락면(envelope)으로 표시되도록 하였다.⁽⁹⁾ 세 가지 리치는 어깨관절을 중심으로 뻗은 팔을 회전시키는 경우, 고정된 상박의 위치에서 팔꿈치를 중심으로 아랫팔을 회전시키는 경우, 발바닥이 바닥에 닿은 상태에서 무릎과 고관절(hip joint)을 중심으로 장단지를 움직이는 경우에 대해 각각 지체 끝이 도달할 수 있는 영역으로 정의하였다. 여러 가지 앉은자세에 대해 포락면을 나타내기 위하여 허리의 굴곡 또는 신전의 크기를 프로그램 상에서 변화시킬 수 있으며, 각 지체관절의 회전범위⁽¹¹⁾도 퍼센타일 값에 따라 변경될 수 있도록 하였다. 리치영역을 제시할 때 모니터 화면을 분할하여 형성된 포락면을 인체모델에 대해 다양한 각도에서 평가할 수 있는 기능도 갖추었다.

진동평가는 운전자에게 전달되는 진동의 크기를 최소화하는 운전석의 강성과 감쇠계수를 결정하기 위해 개발되었다.⁽⁹⁾ 인체의 비선형 진동모델을 이용하여 수치적으로 계산된 인체부위의 응답이 화면상에 도시되도록 프로그램을 구성하였다. 운전석 좌판 밑에 가해지는 진동이 정현파인 경우에는 설계자가 입력신호를 정의할 수 있는 기능과 실험에 의해 측정된 경우에는 그 자료를 입력할 수 있는 기능도 구비하였다.

2.2 메뉴 및 기능

프로그램은 메뉴의 선택에 의해 진행되며, 프로그램 내에 구성된 주메뉴와 세부메뉴는 Table 1과 같다. 프로그램을 실행하면 Fig. 2와 같이 이미 저장된 운전실의 모형과 함께 화면의 상부에 주메뉴판이 제공된다. 기능키와 커서를 이용하여 선택되는 주메뉴에는 File, Change, View, cOMmand, Reach, viBration, System 등이 있다. 이러한 주메뉴는 화면 하부의 명령어란에서 F, C, V, O, R, B, S 중 하나를 입력함으로써 선택될 수도 있다. 주메뉴 중에서 하나를 선택하고, 그 속에서 제공되는 한 세부메뉴를 선택하면, 그 세부메뉴와 관련된 부프로그램이 수행된다. 일례로 Fig. 3은 View라는 주메뉴 속에서 Shading이라는 세부메뉴를 선택했을 때 얻어지는 음영처리된 인체모델의 화면이다.

File메뉴에서 제공되는 세부메뉴는 굴삭기의 정보획득, 디렉토리의 변경, 프로그램에서의 임시 외출, 프로그램의 종료 등에 관한 것이다. 이러한 세

Table 1 Pull-down menu

File	Change	View	cOmmand	Reach	viBration	System
About EXCA	Body	Change	D. Parameters	Arm Test	Test	Man Model Change
Ch. Directory	Joint Angle	Chair	Hand Position	Lower Arm Test		Joint Range ON/OFF
Dos Shell	Item	Test		Lower Leg Test		Background
Exit	Position	Shading		Detection		Items ON/OFF
		Gauge		4 Division Plot		View Mode Change
		S/Board				Reach Mode Change
						Save Settings

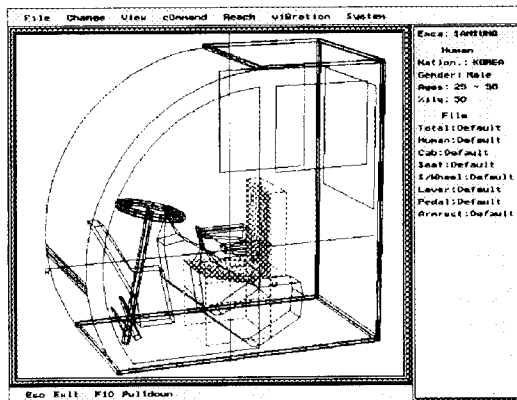


Fig. 2 Cab system of excavator

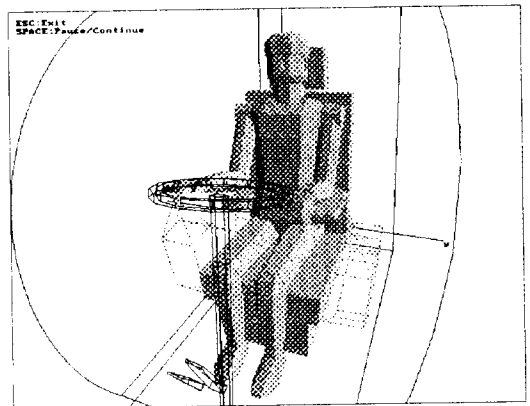


Fig. 3 Shaded man model in workplace

부메뉴 중 하나를 선정하면 팝업메뉴방식으로 해당 화면이 떠오른다. Change메뉴를 통해서 인체모델의 체형, 관절각도, 구성요소, 위치의 퍼센타일, 크기, 또는 설계변수 값을 변경할 수 있는 세부메뉴로 들어갈 수 있다. View메뉴에서는 운전자 시각 위치의 변경, 운전석의 조정, 시야평가, 음영처리, 페이지의 형상과 색상, 스위치보드의 배열 등을 구체적으로 다루는 세부메뉴를 선정할 수 있다. cOmmand메뉴 속에는 설계변수와 손의 위치를 선택하는 세부메뉴가 있다. Reach메뉴에서는 세 종류의 리치평가, 리치의 감지, 4분할화면 상의 도시 등을, 그리고 viBration메뉴에서는 진동평가와 관련된 입력, 해석 및 출력 등을 다루는 부프로그램이 수행된다. System메뉴에서는 인체의 기본모델 변경, 관절운동 범위의 설정 및 해제, 배경의 설정, 일부 구성요소의 포함 및 삭제, 시야모드의 변경, 리치모드의 변경, 설정된 자료의 저장 등을 관장하는 세부메뉴를 제공한다.

3. 인체모델

3.1 표현방식

컴퓨터 그래픽으로 인체모델을 표현하기 위하여 국민표준체위조사 보고서에 발표된 84개 항목에 대한 인체측정자료(부록 참조)를 이용하였다. 발표된 인체모델의 각 지체의 길이, 둘레, 폭 등의 자료를 이용하여 지체를 와이어 프레임 형태의 사각, 육각, 또는 팔각기둥으로 표현하였다. 관절의 움직임에 의해 인체모델 상에서 빈 공간이 나타나는 문제는 관절의 연결부위를 추가함으로써 해결하였다.

다양한 신체를 지닌 작업자에 대한 평가가 가능하도록 한국인 표준체위를 퍼센타일(percentile)과 연령별로 구성하였다. 프로그램 내에서 설계자가 원하는 퍼센타일과 연령을 선택하면 인체모델의 치수가 변경되도록 하였다. 퍼센타일별로는 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 %ile, 연령별로는 20~24,

25~29, 30~34, 35~39, 40~50세에 대한 자료를 입력하였다. 모델의 구성에 이용된 인체측정자료 중 평균, 표준편차, 그리고 5, 50, 95 %ile에 해당하는 수치들을 부록에 제시하였다. 프로그램의 기본적인 인체모델의 치수로 주요 활동 연령인 25-50 세에 해당하는 자료를 선정하였다.

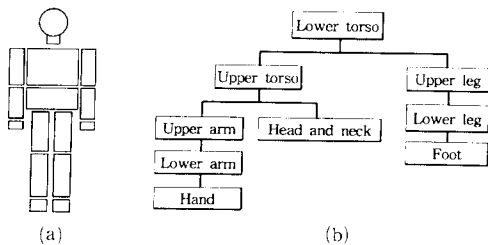
3.2 지체의 모델링

개발된 인체모델의 지체는 Fig. 4에서와 같이 모두 15개의 지체로 구분하였다. 인체모델은 Fig. 4 (a)와 같이 머리와 목, 윗몸통, 아랫몸통, 윗팔, 아랫팔, 손, 넓적다리, 장딴지, 발로 이루어져 있다. 구분된 각 지체를 강체로 가정하여 지체의 변형은 고려하지 않았다. 지체들의 상호관계는 Fig. 4(b)와 같은 계층적 구조를 이루도록 하였다. 아랫몸통을 중심으로 지체들을 연결하는 관절이 움직이면 그 하부 계층의 지체가 움직이도록 하였다. 아랫몸통을 최상위 계층으로 선정한 이유는 굴삭기 운전실의 운전자는 대부분 앉아서 작업을 하기 때문이며, 앉은 자세에서는 기준을 신체의 움직임이 작은 아랫몸통으로 설정하는 것이 편리하기 때문이다.

인체모델에서 둔부, 복부, 흉부 등을 포함하는 몸통의 표현은 Fig. 5와 같이 팔각기둥의 조합으로 구성하였다. 아랫몸통의 모델링에 사용된 인체측정 자료는 허리높이 A_5 , 엉덩이 밑높이 A_7 , 허리너비 A_{26} , 엉덩이너비 A_{27} , 배두께 A_{30} , 엉덩이두께 A_{31} , 앉은 넓적다리 두께 A_{55} 등이다(부록 참조). 아랫몸통 높이는 허리높이에서 엉덩이 밑높이를 뺀 높이, 아랫몸통과 윗몸통이 만나는 부분에서의 너비 및 두께는 각각 허리너비와 배두께, 아랫몸통 너비와 두께는 각각 엉덩이너비와 두께, 그리고 아랫몸통의 볼록한 부분의 높이는 앉은 넓적다리 두

께를 이용하였다. 이와 같이 계산된 높이, 너비, 두께에 대한 자료를 바탕으로 아랫몸통을 모델링하였다. 윗몸통의 모델링에는 앞중심길이 A_{13} , 가슴너비 A_{25} , 젖꼭지간격 A_{28} , 가슴두께 A_{29} , 앉은 어깨높이 A_{31} 등을 이용하였다. 앞중심길이를 아랫몸통과 윗몸통이 만나는 점에서 목과 윗몸통이 만나는 점까지의 높이로, 가슴너비를 윗몸통 너비로, 젖꼭지간격을 윗몸통의 앞면 너비로, 가슴두께를 윗몸통 두께로, 앉은 어깨높이를 윗몸통과 팔이 만나는 부분의 중심높이로 잡았다.

목과 머리는 Fig. 6과 같이 팔각기둥의 조합으로 구성하였다. 머리를 단순한 팔각기둥의 조합으로만 구성할 경우 전·후·좌·우의 구별이 어려워, 귀와 코를 추가하여 현실감을 증대시키고 식별을 용이하게 하였다. 목의 모델링에는 앞중심길이 A_{13} , 목둘레 A_{35} , 앉은 눈높이 A_{50} , 머리길이 A_{63} , 머리너비 A_{64} , 머리두께 A_{65} , 귀구슬사이너비 A_{66} , 눈턱끝길이 A_{70} , 얼굴길이 A_{71} 등을 이용하였다. 앉



(a) Body segments
(b) Hierarchical structure of body segments

Fig. 4 Modeling and structure of body segments

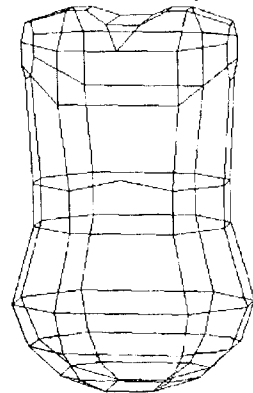


Fig. 5 Torso model

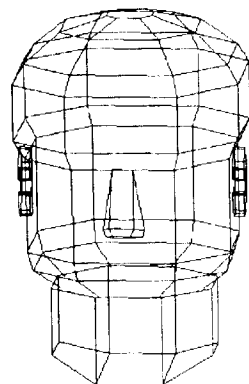
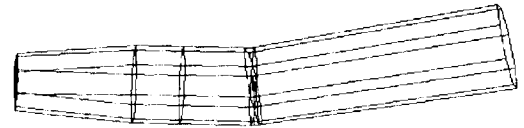


Fig. 6 Head and neck models

은 눈높이에서 앞중심길이를 빼서 목에서 눈까지의 높이, 목둘레로부터 목의 반경, 목에서 눈까지의 높이에서 눈턱끝길이를 빼서 목 길이 등을 구하였으며, 머리길이, 머리너비, 머리두께, 귀구슬사이 너비, 얼굴길이 등에 관해 주어진 자료는 인체모델의 머리를 구성하는데 직접 이용하였다.

인체모델의 팔은 Fig. 7(a)와 같이 팔각기둥의 조합으로 구성하였다. 아랫팔은 보다 현실적인 표현을 위하여 세 부분으로 나누어서 나타내었다. 손은 엄지손가락과 나머지 네 손가락으로 구별하여 모델링함으로써 손바닥과 손등을 구별할 수 있도록 하였다. 팔의 모델링에 이용된 인체측정자료는 앞품 A_{17} , 윗팔둘레 A_{38} , 아랫팔둘레 A_{39} , 앉은 어깨높이 A_{51} , 앉은 팔꿈치높이 A_{52} , 팔꿈치 손끝길이 A_{61} , 손길이 A_{75} 등이다. 앞품을 팔과 윗몸통이 만나는 부분의 중심점 간의 너비, 윗팔둘레를 팔과 윗몸통이 만나는 부분에서의 반경, 아랫팔둘레를 윗팔과 아랫팔의 만나는 부분의 반경, 앉은 어깨높이에서 앉은 팔꿈치높이를 뺀 수치를 윗팔길이, 팔꿈치 손끝길이에서 손길이를 뺀 수치를 아랫팔 길이 등의 계산에 이용하였다. 손의 모델링에는 손길이 A_{75} , 손너비 A_{76} , 손바닥길이 A_{78} , 손두께 A_{79} 등을 이용하였으며, Fig. 7(b)는 모델링된 형상을 나타내고 있다.

다리의 모델링은 팔에서와 같이 팔각기둥의 조합으로 구성하였다. Fig. 8과 같이 다리를 넓적다리 와 장딴지로 나누었으며, 장딴지는 보다 자세한 표현을 위하여 세 부분으로 나누어 표현하였다. 발의 모델링에서는 발목의 중심을 기준점으로 발등쪽과 발가락쪽의 비율을 실제 발과 유사하게 하였다. 다리의 모델링에 이용된 인체측정자료는 회음높이 A_9 , 넓적다리둘레 A_{46} , 무릎둘레 A_{47} , 장딴지둘레 A_{48} , 앉은 무릎높이 A_{53} , 앉은 오금높이 A_{54} , 발목둘레 A_{83} 등이다. 회음높이에서 앉은 무릎높이를 빼서 넓적다리의 길이, 발목둘레 자료로부터 구한 발목의 직경을 발의 높이, 앉은 무릎높이에서 발의 높이를 빼서 장딴지의 길이로 이용하였다. 그리고 넓적다리둘레, 무릎둘레, 장딴지둘레, 발목둘레의 자료로부터 각각 넓적다리, 무릎, 장딴지, 발목의 반경을 구하였다. 발의 모델링에는 발길이 A_{80} 와 발너비 A_{81} 의 자료를 주로 이용하였다. 발의 높이 자료는 위에서 언급한 바와 같이 얻어진 것이 없기 때문에 발목둘레 자료로부터 발목의 직경을 구해 사용하였다. 발의 길이는 Fig. 8(b)과 같이 발목의

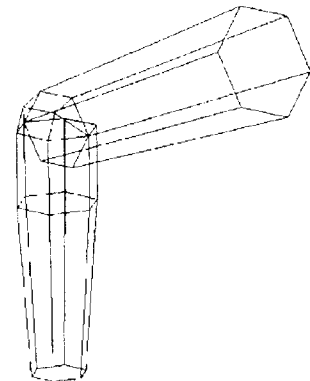


(a) Arm

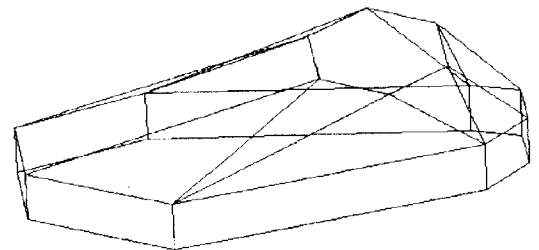


(b) Hand

Fig. 7 Arm and hand models



(a) Leg



(b) Foot

Fig. 8 Leg and foot models

중심을 기준으로 발등쪽으로 17.5%, 발가락쪽으로 82.5%의 비율로 배분하였다.

3.3 관절의 모델링

인체모델에 포함시킨 관절은 어깨, 팔꿈치, 손목, 허리, 고관절, 무릎과 발목 등 모두 13개이다.⁽¹¹⁾ 각 관절에서 모델링된 자유도는 Table 2와 같다. 어깨와 고관절의 자유도는 실제로 3이지만 운전자의 동작분석⁽⁹⁾에서 2자유도를 가진다고 가정하여도 충분하다고 판단하여 2자유도 관절로 모델링하였

Table 2 Modeling of joints

Joint	D.O.F.	Movement
Shoulder	2	Flexion/Extension Adduction/Abduction
Elbow	2	Flexion/Extension Supination/Pronation
Wrist	2	Dorsal/Palmar Flexion Adduction/Abduction
Waist	1	Flexion/Extension
Hip	2	Flexion/Extension Adduction/Abduction
Knee	1	Flexion/Extension
Ankle	1	Dorsal/Plantar Flexion

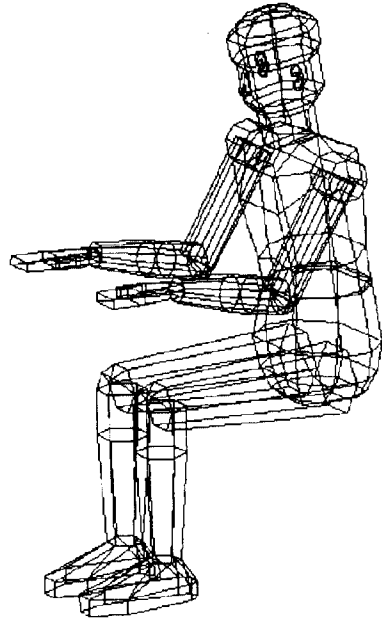


Fig. 9 Human model

다. 팔꿈치와 손목에서도 2자유도 운동이 표현될 수 있도록 모델링하였다. 이와 같이 특정 관절에서 상대적으로 중요하지 않은 운동을 무시하였기 때문에 각 관절에서 자유도가 실제보다 줄어들었다. 굴삭기 운전자의 동작분석 결과 허리의 운동은 굴곡과 신전이 주가 되고 외측 굴곡이나 회전운동은 거의 발생하지 않았다. 따라서, 응용 프로그램 내의 인체모형에서는 허리를 굴곡과 신전운동만이 가능한 1자유도 관절로 모델링하였다. 다른 관절에 대해서도 주로 굴곡과 신전만 일어난다고 가정하여 1자유도로 모델링하였다.

인체 모델링시 관절에서 회전이 발생하는 경우에 관절 주위부분을 별도로 모델링하지 않으면 관절에 부착된 지체가 서로 분리되는 문제점을 가지고 있다. 허리의 굴곡과 신전시 허리운동에 의해 벌어지는 부분에 연결부를 삽입하여 표현하였다. 허리의 회전각도에 따라 연결부분들을 조금씩 회전시켜 표현함으로써 겹치는 부분을 부드럽게 연결시켰다. 어깨관절에 대해서는 윗몸통과 윗팔을 서로 연결하기 위해서 그 연결부를 팔각기둥으로 표현하였다. 팔꿈치관절에 대해서는 팔꿈치를 굽혔을 경우에 윗팔과 아랫팔을 연결하는 세 개의 면을 만들고, 각각의 면에 네 개의 연결점을 두어 팔꿈치의 연결부위를 표현하였다. 팔꿈치의 굴곡과 신전운동에서 팔꿈치의 각도는 음의 값을 가질 수 없으므로 양의 값을 가지는 경우에 대해서만 연결부를 표현하였다. 손목관절에 대해서는 손목의 각도가 0° 이외의

값을 가지는 경우, 손과 아랫팔의 틈을 연결하는 세 개의 면을 두었고 각 면에는 네 개의 점을 두어서 손과 아랫팔의 연결부분을 모델링하였다. 무릎의 굴곡과 신전운동에 의해 넓적다리과 장딴지 사이의 연결부분이 벌어지므로 이 부분도 모델링하였다. 발목관절의 배측과 저측 굴곡 운동에 의해 연결 부분이 분리되는 문제점을 해결하기 위해서 발목관절의 운동에 대해서도 장딴지와 발을 연결하였다. Fig. 9는 각 관절의 연결부분을 추가하였을 때의 인체모형을 나타내고 있다.

4. 시야평가

4.1 시야의 모델링

사람은 일정한 시야각도내에 있는 물체들만을 볼 수 있다. 사람의 시야영역을 타원꼴로 모델링하면 Fig. 10과 같이 나타낼 수 있다. 그림에서와 같이 최대 시각을 눈의 중앙 위치에서 좌·우방향으로는 θ , 상·하방향으로는 ϕ 라고 표시하였다. 프로그램에서는 θ 와 ϕ 를 변경할 수 있도록 구성하였고, θ 와 ϕ 의 기본값으로 각각 94°와 75°로 두었다.⁽¹²⁾ 실제로 인체는 윗방향과 아랫방향의 시야영역이 각각 50~55°와 70~80°로 서로 다르다. 그러나 개발된 프로그램에서는 윗방향의 시야영역보다는 아랫방향의 영역이 더 중요하다. 그 이유는 굴삭기 운

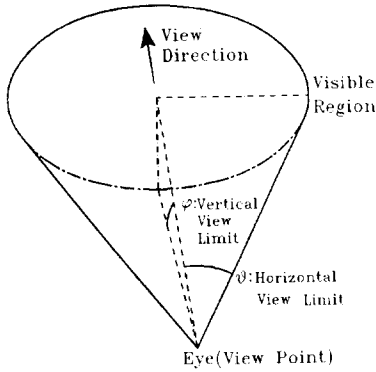


Fig. 10 View range

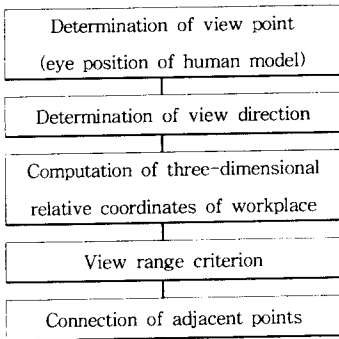


Fig. 11 Flow chart of view algorithm

전자의 작업관찰 영역과 작업에 필요한 운전선의 구성요소가 모두 시야의 아랫방향에 위치하기 때문이다. 따라서, 상·하 방향의 시야영역은 아랫방향의 한계값인 75°를 기본값으로 선택하였다.

시야평가를 위한 알고리즘의 흐름도는 Fig. 11과 같다. 먼저 시점의 위치인 인체모델의 눈 위치를 결정하고, 시선의 방향을 초기값으로부터 변화시킨다. 주어진 시점의 위치와 시선의 방향에서 작업공간 구성요소의 인체모델 시점에 대한 3차원 상대좌표를 계산한다. 계산된 3차원 상대좌표에 대하여 요소의 각 끝점의 시계이탈 여부를 검색한다. 이때 검색 기준은 Fig. 12와 같이 네 가지 경우로 나뉜다. 그림에서 일점 쇄선으로 표시한 타원은 인체모델의 단순화된 시야영역을 나타낸다. ①은 두 끝점이 모두 시야 안에 있는 경우, ②는 한 끝점만 시야 안에 있어 다른 끝점은 시야 밖에 있는 경우, ③은 두 끝점이 모두 시야 밖에 있으면서 두 끝점을 연결하는 직선이 전혀 시야를 지나지 않는 경우, 그리고 ④는 두 끝점이 모두 시야 밖에 있지만 두 점을 연결하는 직선의 일부가 시야에 포함된

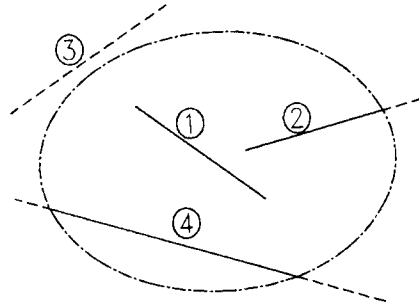


Fig. 12 Search criteria

경우를 나타낸다. 시야에 포함된 각각의 경우에 대하여 두 끝점을 연결하는 직선 또는 그 일부를 작도하게 된다.

두 끝점 또는 그들을 잇는 직선의 일부가 시야영역에 들어오는 지의 검색에는 작업장모델의 3차원 좌표를 시점의 위치에 대한 상대좌표로 변환하여 이용한다. 그리고, 각각의 끝점에 대해 그 점이 타원뿔의 시야영역에 포함되는 지를 검색한다. 이때 이용되는 타원뿔의 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{x^2}{(z \tan \theta)^2} + \frac{y^2}{(z \tan \phi)^2} = 1 \quad (1)$$

여기서, ϕ 는 시야영역의 수직방향 한계각이고, θ 는 수평방향 한계각이다.

시야영역에 들어있는 지를 검색하고자 하는 끝점의 상대좌표값을 식 (1)에 대입하여 그 값이 1보다 작으면 그 끝점은 시야영역에 들어있다고 판단할 수 있다. 이와 같이 두 끝점에 대해 검색을 하면 위에서 설명한 바와 같이 네 가지 경우가 발생할 수 있다.

첫째, 두 끝점이 모두 시야 안에 있는 경우에는 시각좌표계에서의 두 끝점의 좌표값을 화면좌표계로 변환한 후, 두 끝점을 서로 연결하지만 하면 된다.

둘째, 한 끝점만 시야 안에 있는 경우, 두 점을 잇는 직선과 시야영역과의 교점을 찾아서 시야 안에 있는 끝점과 이 교점을 서로 연결한다. 두 점을 잇는 직선과 시야영역과의 교점을 찾기 위하여 다음과 같이 계산한다. Fig. 13에서 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 은 시야영역 안의 점, $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 는 시야영역 밖의 점, $M(x, y, z)$ 은 시야영역의 경계에서 직선 P_1P_2 의 교점이다. 직선 P_1P_2 의 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{x-x_1}{x_2-x_1} = \frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{z-z_1}{z_2-z_1} = t \quad (2)$$

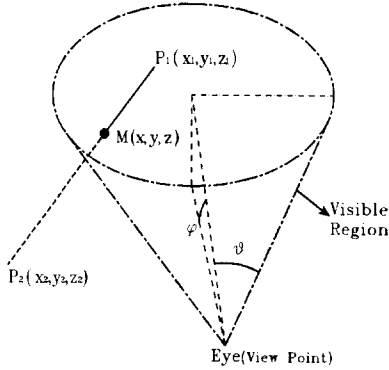


Fig. 13 Intersection in view range

식 (2)에서 교점 M의 좌표 (x, y, z)를 구하여 타원뿔의 식 (1)에 대입한 후 정리하면 다음과 같다.

$$At^2 + 2tB + C = 0 \quad (3)$$

여기서,

$$\begin{aligned} A &= \tan^2\phi(x_2 - x_1)^2 + \tan^2\theta(y_2 - y_1)^2 \\ &\quad - \tan^2\phi\tan^2\theta(z_2 - z_1)^2 \\ B &= \tan^2\phi x_1(x_2 - x_1) + \tan^2\theta y_1(y_2 - y_1) \\ &\quad - \tan^2\phi\tan^2\theta z_1(z_2 - z_1) \\ C &= \tan^2\phi x_1^2 + \tan^2\theta y_1^2 - \tan^2\phi\tan^2\theta z_1^2 \end{aligned}$$

식 (3)을 t에 대해 풀 때 t는 0 ≤ t ≤ 1의 범위 내에 있어야 한다. 이 조건을 만족하는 값을 t*로 표시하면, 한 점 P1은 시야 안에 있고 다른 점 P2는 시야 밖에 있는 경우에는 시야영역과 직선과의 교점 M의 좌표는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} x &= x_1 + t^*(x_2 - x_1) \\ y &= y_1 + t^*(y_2 - y_1) \\ z &= z_1 + t^*(z_2 - z_1) \end{aligned} \quad (4)$$

셋째, 두 끝점이 모두 시야 밖에 있는 경우에는 식 (2)에서 t를 0에서 1까지 0.1씩 증가시키면서 그 때의 각 점에 대해 시야 안에 있는 지를 검색해 나간다. 이 경우에는 두 끝점을 잇는 직선이 전혀 시야영역을 지나지 않으므로, 0 < t < 1의 범위에서 시야영역에 포함되는 점이 검색되지 않는다.

넷째, 두 끝점은 시야 밖에 있지만 두 끝점을 잇는 직선의 일부가 시야영역에 포함되는 경우이다. 이 경우에도 세 번째 경우와 마찬가지로 식 (2)에서 t를 0에서 1까지 0.1씩 증가시키면서 각 점에 대해 시야영역 안에 있는 지의 여부를 검색한다.

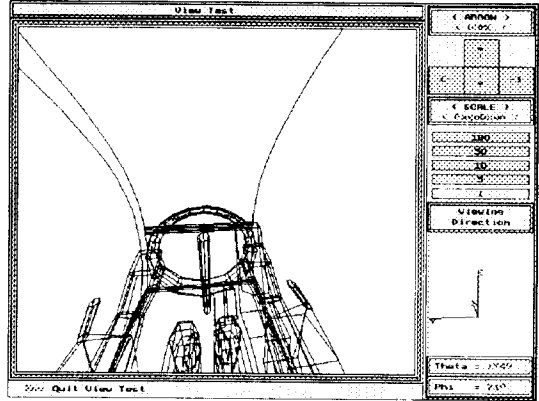


Fig. 14 View display

만약 0 < t < 1의 범위에서 시야 내의 점이 검색되면, 그 점과 P2 사이에서 위의 두 번째 경우에서 처럼 시야영역의 경계와 두 끝점을 잇는 직선의 교점을 찾아서 서로 연결한다.

4.2 시야평가 프로그램

Fig. 14은 위의 과정을 거쳐 굴삭기 내의 운전자 모델의 입장에서 본 운전실의 모습을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 운전자의 손, 팔, 다리 등 인체모형의 일부와 운전대, 패널, 레버의 손잡이, 계기판, 운전실 등 작업장모델의 일부에 대한 가시성을 얻을 수 있다. 화면의 왼쪽 막스 내에는 상부에서 시선의 방향을 상하 또는 좌우로 움직일 수 있는 방향표시가 제공되며, 중간부분에서 시각의 변화폭을 조절할 수 있으며, 하부에는 현재 선택한 시야의 방향을 나타내는 좌표계가 도시된다. 설계 프로그램 내에 이와 같이 운전실의 시야를 제공하는 메뉴를 구성함으로써 설계단계에서 운전자에게 확보되는 시야를 미리 평가할 수 있다. 모든 중장비 차량에서 안전상 확보되어야 하는 시야가 정해져 있으므로 허용되는 인체의 움직임 내에서 어떠한 시야가 확보되는지를 메뉴를 통해서 예측할 수 있다. 특히 시야평가 기능을 통해서 설계된 작업장모델의 각 구성요소가 시야범위 내에 있는 지를 판단함으로써 운전실 내에서 그 위치를 결정하는 데 유용하게 사용될 수 있다.

Fig. 14에서 운전대의 오른쪽 앞 부분에 위치한 계기판은 운전자의 오른손과 운전대에 의해 상당부분이 가리워져 있음을 알 수 있다. 중장비에서는 계기판에 제시되는 표시내용이 주행상태보다는 작

업상태를 나타내는 것이 대부분이므로 이 계기판이 작업 중에서도 쉽게 눈에 띄는 위치로 이동되어야 한다. 굴삭작업 중에는 운전자의 손이 주로 운전석의 좌우에 있는 레버 위에 놓여 있으므로 이러한 경우에 대하여 계기판의 위치가 우선적으로 고려되어야 한다. 이러한 작업특성을 감안할 때 계기판을 화면에 제시된 현 위치보다 더 오른쪽으로 이동하는 것이 계기판의 시야확보 측면에서 바람직하다고 평가된다.

본 연구의 프로그램을 통해 확보되는 시야를 정량적인 결과로 제시하기 위해서는 지속적인 연구가 요망된다. 인체모델에서 관절의 자유도도 증가되어야 하며, 중장비 주위의 지면에 대한 정보도 모델링에 포함되어야 하고, 거울을 통해 얻어지는 시야의 확보도 고려되어야 한다. 중장비의 종류에 따라서 다르게 허용되는 운전자의 신체 움직임의 범위가 프로그램 내에 입력된다면 운전실의 설계에 보다 효율적으로 사용될 수 있는 시야평가 프로그램으로 발전될 수 있을 것이다. 본 프로그램을 차량의 운전석 및 운전실, 항공기와 선박의 조정실 등의 작업공간에 적용시킬 수 있도록 개선하면 범용 CAD 프로그램의 구현도 가능하리라고 본다.

5. 결 론

본 연구에서는 중장비 운전실을 설계하기 위한 PC용 CAD 프로그램을 개발하였다. 운전실 설계 프로그램에서 중요한 요소인 운전자와 운전실의 모델을 제시하였다. 인체모델은 모두 15개의 지체로 이루어지도록 구성하였고, 그 형상은 국민표준체위 조사 보고서에 발표된 측정자료를 이용하여 표현하였으며, 다양한 인체치수에 대해 모델의 그래픽 표현이 가능토록 하였다. 작업장모델의 구성에 굴삭기 운전실의 외형과 그 내부 구성요소인 운전석, 운전대, 페달, 레버 및 콘트롤박스, 패널 등을 포함시켰다. 그리고 프로그램에 인간공학적인 평가 기능을 부여하기 위하여, 인체의 시야영역을 타원뿔로 모델링하고 이에 따른 시야평가 알고리즘을 개발하였다. 이러한 시야평가 기능을 통해 인체모델에 대한 작업장모델의 가시성을 판단할 수 있으므로 중장비의 설계단계에서부터 운전자에게 확보되는 시야를 미리 평가할 수 있게 되었다. 굴삭기 운전실과 같은 큰 규모의 작업공간을 제작하기 위한 초기 설계단계에서부터 개발된 응용프로그램을 이

용하면 운전실 모델의 선정과 시제품의 설계, 제작에 소요되는 시간과 경비를 크게 절약할 수 있을 것이다. 본 연구의 프로그램이 정량적인 평가결과를 제공하기 위해서는 지속적인 연구가 이루어져야 하며, 중장비의 운전실 뿐만 아니라 차량의 운전석 및 운전실, 항공기와 선박의 조정실 등 다양한 작업공간에 프로그램을 확장·적용시킨다면 독자적인 범용 CAD 응용프로그램의 구현도 가능하리라고 본다.

참고문헌

- (1) 이면우, 이달호, 장성록, 1986, "인간공학적인 작업공간 설계를 위한 CAD 응용방안," 대한산업공학회지, 제12권, 제2호, pp. 13~19.
- (2) 정의승, 정민근, 기도형, 1993, "동작한계 예측을 위한 해석적 알고리즘의 개발," 대한인간공학회지, 제12권, 제1호, pp. 17~24.
- (3) Karwowski, W., Genaidy, A. M. and Asfour, S. S., 1990, *Computer-Aided Ergonomics*, Taylor and Francis, New York, pp. 31~156.
- (4) Mital, A. and Karwowski, W., 1991, *Work-space, Equipment and Tool Design*, Elsevier, Amsterdam, pp. 29~66.
- (5) 강동석, 정의승, 1993, "인체모델 개발을 위한 개체지향적 데이터베이스의 구축," 대한인간공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 10~17.
- (6) Jung, E. S., Kang, D. S. and Shin, Y. T., 1994, "Development of a Workplace Modeller for Ergonomic Evaluation Models," *Proc. of the 3rd Pan-Pacific Conf. on Occupational Ergonomics*, pp. 346~350.
- (7) 공업진흥청, 1992, 국민표준체위조사 보고서, pp. 1~316.
- (8) 신영수, 김현석, 1991, 3차원 그래픽: C언어로 배우는 이론과 알고리즘, 가남사, 서울, pp. 124~315.
- (9) Lee, H. T., Son, K. and Chang, S. R., 1994, "An Ergonomic Program of the Operator-Seat Cab System for Heavy Construction Equipment," *Proc. of the 3rd Pan-Pacific Conf. on Occupational Ergonomics*, pp. 147~151.
- (10) 손권, 조규갑, 장성록, 황영돈, 최용석, 이희태, 정창욱, 박창규, 1995, "굴삭기 운전실 내부

- 의 인간공학적 설계," 삼성중공업 보고서, pp. 1~173.
- (11) Chaffin, D. B. and Andersson, G. B. J., 1984, *Occupational Biomechanics*, John Wiley & Sons, New York, pp. 78~232.
- (12) 박경수, 1993, 인간공학-작업경제학-(개정판), 영지문화사, 서울, pp. 129~218.

부 록

Measurement item	Ave. (cm)	S.D. (cm)	5%ile (cm)	50%ile (cm)	95%ile (cm)
A ₁ Stature	168.4	5.2	159.9	168.3	177.0
A ₂ Eye height	156.8	5.1	148.2	156.7	164.9
A ₃ Acromion height	137.4	4.7	129.2	137.3	145.2
A ₄ Neck height posterior	144.5	5.2	135.7	144.5	153.2
A ₅ Waist height	101.9	3.9	95.4	101.9	108.2
A ₆ Olecranon height	102.6	3.8	96.3	102.6	109.1
A ₇ Gluteal furrow height	72.7	3.4	67.1	72.7	78.1
A ₈ Fingertip height	63.4	3.0	58.4	63.4	68.4
A ₉ Perineum height	74.5	3.4	69.0	74.4	80.3
A ₁₀ Trochanter height	81.7	3.7	75.9	81.6	88.0
A ₁₁ Tibial medial height	46.2	2.7	41.6	46.4	50.6
A ₁₂ Overhead fingertip reach	213.6	7.2	202.0	214.0	225.0
A ₁₃ Waist front length	35.7	2.3	32.0	35.8	39.5
A ₁₄ Back length	44.0	2.4	40.0	44.0	48.0
A ₁₅ Gluteal length	28.9	2.2	25.5	28.9	32.5
A ₁₆ Shoulder length	15.4	1.4	13.2	15.5	17.6
A ₁₇ Front interscye breadth	36.6	3.0	31.1	36.7	41.0
A ₁₈ Back interscye breadth	41.4	3.8	34.4	42.0	47.1
A ₁₉ Sleeve length, lateral	52.5	2.3	49.0	52.4	56.4
A ₂₀ Sleeve length, medial	43.1	2.2	39.7	43.0	47.0
A ₂₁ Neck to ulnar styloid length	75.7	2.8	71.0	75.8	80.2
A ₂₂ Crotch length	73.1	4.6	65.5	73.0	81.0
A ₂₃ Acromion to acromion breadth	37.8	2.0	34.2	38.0	40.8
A ₂₄ Maximum body breadth	45.4	2.8	40.8	45.4	50.0
A ₂₅ Chest breadth	29.7	1.8	26.9	29.6	32.9
A ₂₆ Waist breadth	27.6	2.2	23.8	27.6	31.3
A ₂₇ Hip breadth	32.2	1.6	29.6	32.1	34.9

A ₂₈	Nipple to nipple breadth	17.4	1.5	15.0	17.3	20.1
A ₂₉	Chest depth	21.8	1.9	18.7	21.8	25.1
A ₃₀	Abdominal depth	21.3	2.2	17.8	21.2	25.2
A ₃₁	Hip depth	22.2	2.4	18.3	22.1	26.0
A ₃₂	Arm reach to wall length, lateral	106.0	3.8	99.7	105.9	112.1
A ₃₃	Arm reach to wall length, anterior	81.0	3.6	75.1	80.9	86.9
A ₃₄	Span	167.4	6.2	157.1	167.5	177.2
A ₃₅	Neck circumference	36.5	1.9	33.4	36.4	39.7
A ₃₆	Neck root circumference	39.7	2.0	36.4	39.7	42.9
A ₃₇	Armhole circumference	41.3	2.8	37.0	41.1	46.4
A ₃₈	Upper arm circumference	29.1	2.3	25.4	29.1	32.8
A ₃₉	Forearm circumference	26.0	1.6	23.5	26.0	28.8
A ₄₀	Upper chest circumference	85.5	5.2	77.5	85.1	95.0
A ₄₁	Middle chest circumference	91.3	5.6	82.3	90.9	101.2
A ₄₂	Lower chest circumference	77.6	5.6	69.1	77.1	88.2
A ₄₃	Waist circumference	80.5	7.2	68.9	80.4	92.3
A ₄₄	Abdominal circumference	83.8	6.3	73.5	83.9	94.4
A ₄₅	Hip circumference	92.2	4.9	84.0	92.1	100.2
A ₄₆	Thigh circumference	53.1	4.0	46.4	53.2	59.6
A ₄₇	Knee circumference	36.2	2.2	32.9	36.0	40.0
A ₄₈	Calf circumference	36.2	2.4	32.2	36.1	40.0
A ₄₉	Sitting height	91.4	3.0	86.5	91.3	96.4
A ₅₀	Eye height, sitting	80.0	3.1	74.8	80.1	84.9
A ₅₁	Acromion height, sitting	60.4	2.7	56.1	60.5	64.8
A ₅₂	Elbow rest height, sitting	26.8	2.3	23.0	26.9	30.5
A ₅₃	Knee height, sitting	49.7	2.1	46.1	49.6	63.0
A ₅₄	Popliteal height, sitting	40.8	2.0	37.7	40.7	44.1
A ₅₅	Thigh depth, sitting	14.0	1.4	11.7	13.9	16.4
A ₅₆	Buttock to knee length, sitting	55.0	2.4	51.1	55.0	58.8
A ₅₇	Buttock to popliteal length, sitting	45.7	2.4	41.7	45.7	49.6
A ₅₈	Hip breadth, sitting	33.9	1.9	30.8	34.0	37.1
A ₅₉	Functional leg length	105.2	4.2	98.0	105.3	112.2
A ₆₀	Acromion to olecranon length	34.1	1.4	31.9	34.0	36.3
A ₆₁	Olecranon to fingertip length	44.1	1.7	41.3	44.1	47.0
A ₆₂	Overhead fingertip reach, sitting	133.8	4.6	126.2	133.8	141.5

A ₆₃ Head height	23.1	1.1	21.3	23.2	24.9
A ₆₄ Head breadth	16.3	0.6	15.3	16.3	17.3
A ₆₅ Head length	18.6	0.7	17.4	18.6	19.7
A ₆₆ Bitragus breadth	14.7	0.6	13.7	14.7	15.8
A ₆₇ Bitragus to submandibular arc length	31.1	1.6	28.5	31.0	33.8
A ₆₈ Bitragus to menton arc length	33.1	1.4	30.8	33.0	35.4
A ₆₉ Bitragus to vertex arc length	38.5	1.6	35.0	37.5	40.3
A ₇₀ Eye to menton length	11.6	0.8	10.3	11.6	12.9
A ₇₁ Menton to crinion length	19.7	1.1	17.9	19.7	21.6
A ₇₂ Head circumference	56.8	1.5	54.3	56.8	59.1
A ₇₃ Pupillary distance	6.3	0.3	5.8	6.3	6.9
A ₇₄ Lip breadth	4.8	0.4	4.2	4.8	5.6
A ₇₅ Hand length	18.1	0.8	16.9	18.1	19.4
A ₇₆ Maximum hand breadth	9.4	0.8	8.0	9.5	10.7
A ₇₇ Hand circumference	20.6	1.0	19.0	20.5	22.2
A ₇₈ Palm length	10.3	0.5	9.4	10.3	11.1
A ₇₉ Hand thickness	2.8	0.2	2.5	2.7	3.2
A ₈₀ Foot length	24.7	1.0	23.1	24.7	26.4
A ₈₁ Foot breadth	10.2	0.5	9.3	10.2	11.0
A ₈₂ Instep circumference	25.7	1.2	23.7	25.6	27.8
A ₈₃ Ankle circumference	24.8	1.2	22.8	24.8	26.9
A ₈₄ Weight (kgf)	66.4	7.9	54.0	66.0	80.0